

海水淡化 RO 膜装置调试运行及 O&M 风险管理

摘要

大型海水淡化 RO 工程技术在沿海地区的缺水地带或者高密度人口地域作为提供饮用水以及工业用水的新的技术手段被广泛采用。水需求的日益增大是大型 RO 工程建设的重要源动力，随着 RO 海淡技术的普及，海水淡化 RO 膜技术以及包括周边配套技术的应用可靠性增强和经济性改善的同时，仍被发现依然存在着某些问题。

作为给水设备中不可缺少的组成要素 RO 膜，膜法脱盐系统的系统可靠性有了一定的提高，从膜元件制造商的角度来看，遵守事先的注意事项，履行正常的操作规定就可以规避事故的发生从而避免运行调试周期的延长和膜元件被迫更换的事例发生。

一般来说，RO 技术为了适用于现有的公共饮用供水系统，对于设备供应商以及系统运行服务商，必须严格地要求保证设计规格的生产水量以及产水水质。膜元件制造商在合同中被要求承担的义务远远超过脱盐系统的运行成本中 RO 膜所占的比例。在描述 RO 膜的脱盐项目中由于不完善的预处理导致膜污染的文献、报道很多，但是对于运行参数的设计和调试时的注意事项这方面发表却很少。

本论文对 RO 系统风险管理方法进行介绍，希望一部分用户在拥有一定的运行管理知识后，就可以避免错误的设计或者运行调试中的不当造成膜元件破损等类似事故的发生。并且对运行调试中发生的膜元件破损现象的故障原因和如何应对进行分析和讲解。本论文的目的是通过膜制造商的视点，就 RO 膜脱盐系统存在的共通问题的信息共享，为建立更客观的风险管理作出提案。对 RO 脱盐水处理行业内发生的故障通过公开讨论，期待将来的膜法脱盐系统的运行的可靠性更为提高。

概述

近年来，包括使用我公司的 RO 膜产品在内，实际全球已经投运的超 10 万吨/天的大规模 RO 脱盐装置越来越多。其中一部分 RO 系统，由于缺少在调试运行初期的正确参数设定，以及投运后在维护管理方面的知识不足，造成机械性故障以及其他性能上的故障时有发生。因为海水淡化用 RO 卷式膜系统的基本材料都是由高分子材料构成，对于操作失误造成的负面影响极其敏感，所以在操作时要严格注意。

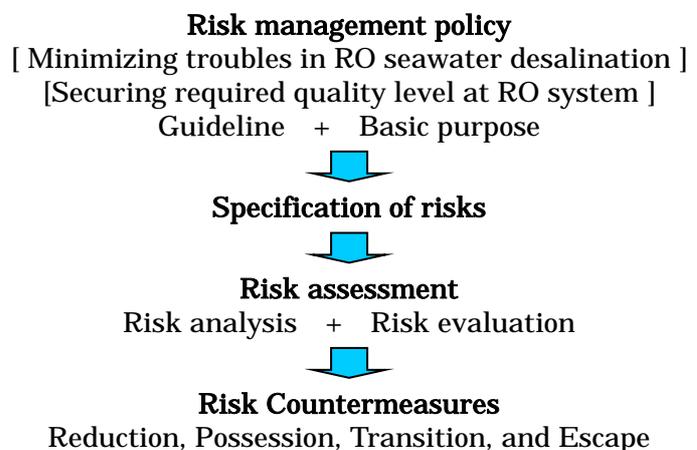


Figure 1 Basic Scheme of Risk Management

1. 风险管理的基础

谈到风险管理首先从说明如何处理对待风险开始。右图显示 RO 海水淡化项目的风险对应的管理方法。一般的风险管理的常见方法是降低，转移，保持，回避。但是在海水淡化项目中，海水 RO 系统的设计，建设，运行，管理等要素为主，一般降低和保持的因素不作为常见选择项。

本论文，重点就 RO 膜氧化，预处理不完善等原因引起膜性能下降，以及系统启动的失误引起系统故障的风险管理进行讨论。

一般，水制造设备技术是由多个单位元件所组成，例如送水，配水管线，泵，砂滤系统等专业知识可以通过设计手册中获得。但是相关 RO 膜系统设计，承建稳定的具有高可靠性的脱盐装置对于一般新入行的技术人员有一定的困难。反渗透脱盐技术作为可实施的新技术工艺被采纳时，相关信息及相关联的技术储备不足的原因和现有水处理技术相比，对于掌握 RO 膜系统的设计技术、技巧显得尤其重要。因此，从膜元件制造厂商的角度我们强调在设计海水淡化 RO 海水淡化系统时，膜生产商，工程设计者，终端用户能够从 good engineering practice 的观点出发相互支持配合，为整体风险管理或者品质的提升做出应有的贡献。

本论文揭示了一些我们曾经经历过包括预处理在内 RO 系统的设计和误操作导致的技术性故障。特别对于刚刚接触膜法水处理的工程公司以及用户能够避免常见的故障有所帮助。

再发性海水淡化装置故障的防止

风险的认识

设计及运行膜法脱盐系统时，正确掌握潜在风险，认识理解风险管理方法需要制订一个基准。作为膜元件的制造商希望刚刚接触膜法水处理或者入行不久的工程公司以及用户能够理解如何构筑高稳定性的 RO 系统，能够掌握使用无事故系统设计技术。过去十多年积累的事故事例应该能够作为如何成为避免故障发生，实行风险管理的经验总结。对于刚接触膜法水处理或者入行不久的工程公司以及用户来讲，首要目标是应该如何避免由于脱盐装置的错误设计和调试运行中的误操作导致相关故障发生。

RO 海水淡化装置的潜在风险

RO 海水淡化装置中有很多故障事例是因为设备上的原因引起的，对为什么会发生故障进行分析，可以帮助如何再次避免故障发生提供有益的提示。第一种是运行中发生的故障，这一般是由于错误的运行状态引起，会导致脱盐率或产水流量下降，只要重新设定正

确的运行状态就可以恢复。第二种是 RO 膜系统设计的不正确或误操作造成膜受到损伤导致致命性的膜性能下降，这样的损伤造成的性能恶化是很难被恢复的。以下列举部分我们经历过的常见故障事例以及如何避免的方法作相对的阐述。

在职培训和脱产培训

通常，OJT(在职培训)或者 Off-JT(脱产培训)能够降低设备故障的潜在风险。通过培训，这些故障事例可以被新进的工程技术人员消化、引起重视。而目前的现状，这些故障事例仅仅是当成技术资料的积累，而未被更多的有效利用。

有效且及时地通过利用 OJT 或是 Off-JT，强化刚接触膜法水处理或者入行不久的工程公司以及用户和膜厂家的互动交流可以大幅度增强对风险管理意识的提高，作为有用借鉴，可以活用于如何防止故障的发生。

发生频度高，损坏严重的故障

就海水淡化而言，反渗透膜元件的损坏大半是发生在膜元件装填及运行初期。因为反渗透膜元件是非常精密的产品，很容易遭受机械性损坏。所以我们要充分意识到最初的系统调试的初期，其风险也是最大的。

下面介绍在运行调试时的典型事例。我们推荐在膜元件设置和开始运行前对配管工的操作通过 OJT 或 Off-JT 的方式进行培训，可以有效防止故障产生几率。比如，即使仅仅通过半日的技术讲座，能够使参与讲座的技术工人获取足够的故障防止技能。

风险分析的设计审查 (DR)

作为风险管理流程中的一环，推荐进行设计审查(Design Review, DR)。通过 DR 可有效地分析各个海水淡化项目的潜在风险，并加以排除。项目进行的初期阶段，通过由膜制造商，承建商，设计单位，业主的工程人员参与的 DR 是非常有效的手段。

DR 是为了从不同观点对应所有风险要素，一般多部门(例：项目，建设，现场监督，操作，采购等相关部门代表)组成人数不多的小组，通过监督检查可以减少风险的发生概率，对项目成本，工程周期的消减起到一定的积极作用。

· 故障事例

以下介绍的是，在海水淡化装置设置前的设计阶段，以及投运前必须着重留意的多发事故的典型事例的种类和原因。这类信息特别对于相对经验缺乏的工程技术人员或者新的用户也许很难被理解，所以很难对重要故障回避作出具体对应。还有，考虑到信息共享不足等因素，多数场合不能满足避免故障再次发生的目的。因此，从膜厂家的立场出发，使工

程公司的设计人员以及终端用户容易接受、理解的方式讲解曾经经历过的，对 RO 膜损害危险性高的典型案例中得到的经验教训。

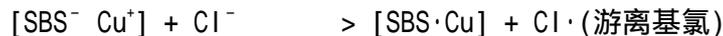
1) 供给原水

铜离子的催化现象

铜离子作为催化剂若过量存在在海水中，容易造成氯元素发生自由基反应从而损伤膜元件性能，最大允许的铜离子浓度必须控制在 10ppb 以下。这一见解是基于日东电工在 1995 年海水淡化的 RO 实验装置上发生的膜氧化降解现象的分析中得到的。 [1]。这一现象也曾经在中东的红海某海淡装置中发生过。有报告说原水中的铜离子及钴离子超过 10ppb 的时候，会发生特异的氧化降解现象 [2]。

一般聚酰胺膜对游离氯非常敏感，通常添加亚硫酸氢钠(SBS)中和原水中的游离氯，各膜制造商推荐在原水中的游离氯含量应保证在检测不出或为零的标准。SBS 作为还原剂发生脱氯反应是总所周知的事实，但如果泵，管路部件等含有铜合金，铜离子浓度增高，发生铜催化反应，这时 SBS 将不但无法起到还原剂的作用，反而会作为氧化剂的发生源在脱氯过程中产生游离氯造成聚酰胺 RO 复合膜脱盐性能下降。

催化现象的氧化反应如下：



我们认为在铜共存的情况，海水中的 SBS 会促使游离氯发生[2]。换句话说，在海水淡化膜系统中为了防止 RO 膜的氯氧化现象的发生，应该严格禁止使用含有铜合金材料的管线或泵。预处理系统中使用铜合金材质的部件也会存在相同的风险，RO 系统中特别是铜金属的管线设计原则上应该禁止。为了抑制海水中藻类生长，添加数 ppm 的硫酸铜 (CuSO4) 时，要注意 SBS 的添加使用。另外，预处理用化学用品例如 FeCl3 以及 SBS 等中会有时含有铜化合物等不纯成分。

2) 调试运行中的故障

流体力学的冲击应力造成机械性损害

海水淡化的操作压力一般在 50-80bar 之间的高压力下运行，尤其是在启动和停机时，高压泵迅速地升压和卸压过程会产生巨大的剪断应力造成 RO 膜元件机械性破损事故。高压泵升压/减压一般推荐在以 10psi /秒或者更低的加压速度下启动。

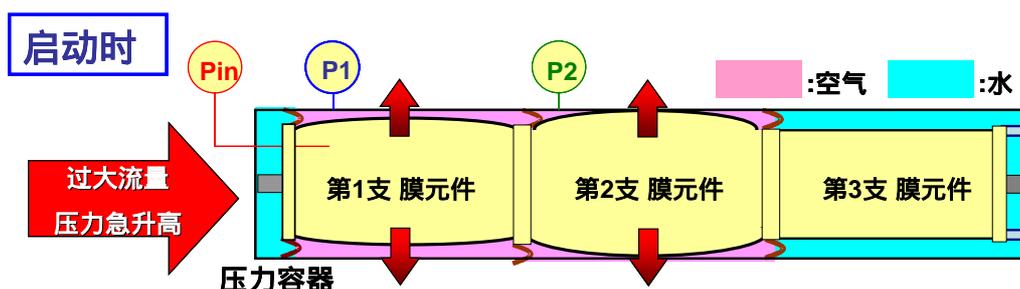


图 1 系统启动时的水流示意图。

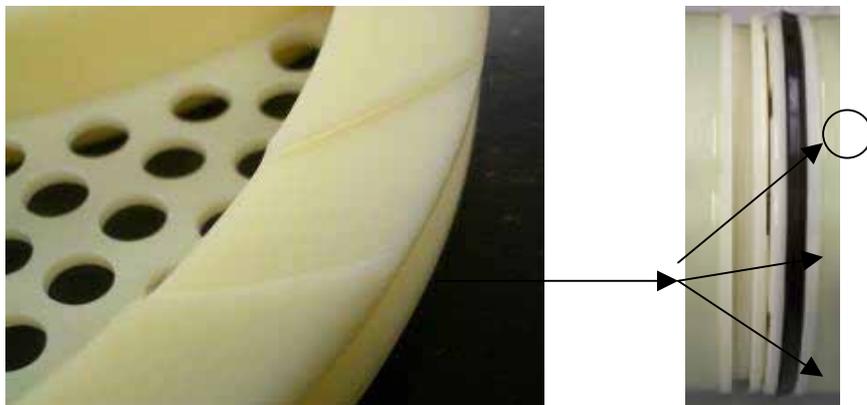
在启动系统时，高压泵升压同时大量的原水流入系统中，造成先头的 2 支膜元件内部压力 (P_{in}) 迅速升高，而膜元件与膜壳之间的空气很难瞬间排出处在大气压状态，使膜元件内部的压力远远地高于膜元件与膜壳之间的压力 (P_1, P_2)，形成压力差 ($P_{in} \gg P_1, P_2$)，造成如照片 1 所显示的破损现象。



照片 1 膜元件 FRP 破裂

通过调节连通阀调节原水流量的变化比例或者启动高压泵增压速度控制在 10psi/秒以下，缓慢地调节进水高压泵的压力。增压/减压的注意事项相同，对 RO 膜施加的压力增减速度应该

控制在 10psi/秒以内的压力变化范围。过快的增减压力速度变化，会对膜元件或密封圈造成机械性破损。尤其是在 RO 系统急停车时，原水流量，浓水流量发生急剧变化会发生水锤以及真空现象，造成膜片表面的剥离。为了降低上述原因引起的膜元件的破损现象的发生，美国海德能公司通过对膜元件端盖进行改良，如图照片 2 所示在膜元件两端的端盖上增设了 6 个排气槽可以使空气可以快速地排除系统。



照片 2 膜元件端盖排气构造图

用图 1 的模式模拟测试现行产品的端盖和增设排气槽的端盖先头 2 支膜元件在系统启动时的 P_{in}, P_1, P_2 压力上升分布曲线。结果显示在图 2 中。左图现行端盖设计产品在系统启动初期膜元件内部和膜元件与膜壳间产生压力差。现对在增设排气构造的膜元件内部和膜壳之间几乎已相同的压力上升没有压力差产生，从而有效地防止了膜元件在海水淡化系统初期启动时膜元件破损的几率。本发明已经率先申请了发明专利。

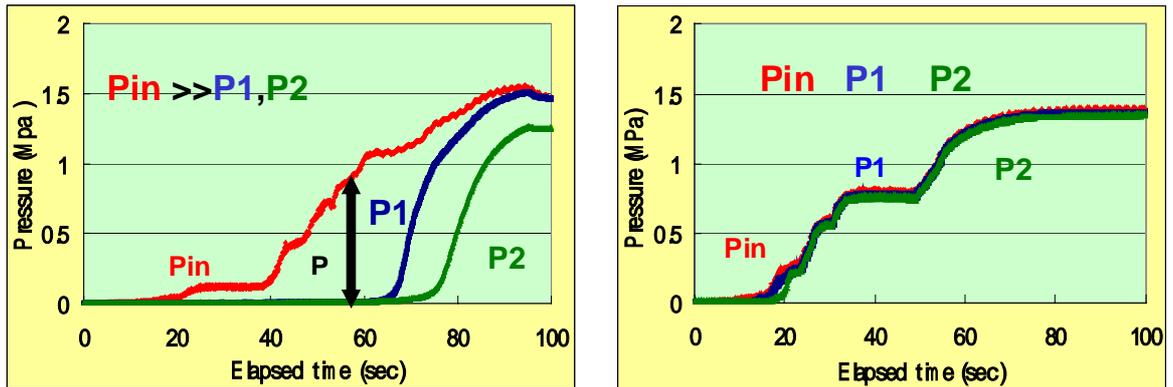


图 2 膜壳内部压力分布测试结果。左图为现行端盖设计，右图为新型端板排构造设计。

3) 进水泵的鼓动以及振动/潮音波

泵的脉冲以及高频振动会造成高分子疲劳从而可能引起 RO 膜的破损。特别是柱塞泵系统，为了缓解冲击有必要设置适当的压力和容量的累加器。振动强度的强弱直接影响系统运行中的振动/超声波对 RO 膜的损伤情况。

因此，有必要减少阀门的下游产生的气蚀现象。

4) 典型 RO 系统设计和运行操作的故障

(4-1) 脱气口设计

典型设计的故障脱气口没有设置在原水/浓水侧的高位处。如果没有脱气口，压力容器的原水流入无法有效地排气。RO 系统运行时存在大量的空气随着压力上升而造成膜元件的破损现象发生。

4-2) 人为失误/操作程序错误造成阀门关闭

浓水阀门全关闭运行，给水压力过度上升，使 RO 膜表面蓄积大量污染物质，导致膜元件瞬间污染的现象使膜元件的性能急剧下降，整个系统处于非常危险的状态。

产水侧的阀门全关闭会产生相关管路破损的危险。产水阀若处在全关闭状态，而运行 RO 系统，只要产水侧的压力高于 1MPa，PVC 管路就会发生破损。即便及时发现以上的误操作采取紧急停机，也会造成产水侧的压力很可能瞬间高于原水侧的压力，造成背压现象，当背压超过 0.5bar 时，膜片就会发生剥离等不可逆损伤。

5) 预处理系统操作的典型事故事例

(5-1) 原水中 SBS 的添加问题

常见的问题有两种，一种是 SBS 在寒冷条件下容易发生结晶现象。所以，冬天温度低时要及时调节 SBS 的浓度保证在低温下不会发生结晶。另外，药品注入系统气泡堵塞现象也是在 SBS 添加故障中常见的。

6) 未遵守 RO 膜元件的安装操作步骤造成故障的发生

过去，经常碰到不遵照 RO 膜元件的安装操作步骤导致故障的发生，造成 RO 膜元件性能下降的事例。在下文中，对于 RO 膜元件的安装过程中，对于操作步骤里的安装说明若未加遵守而造成的 RO 膜元件性能下降的事例做一些说明。

* 忘记 RO 膜元件的固定用推止环的设置

容器内部 RO 膜元件的原水 on-off 时产生膜元件流动现象。如果忘记安装推止环，膜元件在压力容器内部频繁地前后位移，会造成密封圈处在不安定的状态，导致密封不良而产生的脱盐率下降。

* 忘记安装容器内 O 型圈及连接器

忘记安装 O 型圈会导致整体系统的脱盐率下降。

* 装膜时润滑剂的使用错误

装填膜元件时为了便于安装在 O 型圈涂上硅膏，使 O 型圈有一定的润滑效果后安装不会造成 O 型圈在安装时受到过大的应力发生破损。但是如果使用植物油等有机类润滑剂涂抹到集水管处可能会造成产水集水管破裂。所以在使用润滑剂时一定要谨慎，最好使用膜制造商推荐的指定产品。

甘油可以作为润滑剂使用，但是在高压运行的海水淡化装置上不推荐使用。因为甘油很容易被清洗掉，不能够起到长期保持润滑效果，如果仅仅只使用甘油，O 型圈更容易有被磨损的风险。

* FRP 容器安装的破裂

FRP 容器安装在设备机架上时，如果没有安装缓冲材料而直接用 U 型绑带固定就有可能导致压力容器产生裂痕。在运行中 FRP 的膨胀和窜动使得 U 型绑带固定处的 FRP 容器有发生破损的危险。

7) 人为失误

操作工在实施系统清洗时，使用化学药品的使用量以及计量误差的问题时有发生。为了避免相关类似人为失误，加强药品放置地点的管理，不在相同的地方放置不同的药品。

计量仪器尽可能地使用精度较高的仪器，比如 pH 测试中使用 pH 计代替 pH 试纸，提高 pH 值的测量精度。当失误发生时，与其追究是谁造成的失误不如能从根本的管理上使个人愿意公开失误的原因所在，通过大家分享失败的教训，可以对预防甚至避免再次发生起到积极的作用。过去的失败可以用来避免新的失败发生，不仅仅可以节省开支，还可以减低环境负荷和在推广 RO 技术上起到积极作用。

· 结论

对于风险的预防以及控制水平是通过失败后的经验积累形成的。故障信息不要单纯的作为信息对待，为了能够有效的认知和再利用，应该把信息提高到经验总结的水平。我们希望本篇论文提及的曾经经历过的经验能够成为大家预防故障发生的有用借鉴。RO 的制造商在海水脱盐装置中故障解决的经验应该整理成公开的可共享延续的技术。我们作为 RO 膜的制造供应商衷心希望 ROM 膜的使用客户不要反复地经历相同的故障。因此，我们作为 RO 膜元件的制造商或者膜元件基本设计的专业咨询公司，可以对避免 RO 膜系统由于 D.B.O 而可能失败的结果提供技术上的支援。并且，作为膜元件制造商对于分离膜技术的转让可以向用户提供 OJT 或者 OFF-JT 等多种技术交流、培训。

参考文献

- [1] M.Nagai et al., "The behavior of oxidizing / reducing agent in sea water" Desalination & Water Treatment, Japan p.253-262 (1993)
- [2] I. Kawada, K. Nagura, H. Iwahori and Y. Kamiyama, "Generation of Certain Oxidizing Agents by SBS and Their Inhibition with High Copper Concentrations in Seawater Desalination Systems" p.381-390, Vol. VI, IDA World Congress, Abu Dhabi, November 18-24, (1995)